

論文 小径ドリル型削孔試験跡を利用した透気性評価手法と簡易透気速度とドリル削孔速度との関係に関する実験的検討

安江 歩夢*1・加藤 風紗*2・犬飼 利嗣*3・藤森 繁*4

要旨：本研究では、小径ドリル型削孔試験の削孔跡を試験孔とした構造物表層の透気性評価の可能性を検討することを目的に、配合要因がドリル削孔跡を利用した簡易透気速度およびドリル削孔速度に及ぼす影響について検討した。また、削孔速度と簡易透気速度との関係についても検討した。実験結果より、削孔跡を利用した簡易透気速度は、従来法による簡易透気速度と同様に水セメント比の差異を捉えられることから、削孔跡を試験孔とした場合にも、表層品質を評価できることが示された。また、本実験においては、簡易透気速度と削孔速度の評価範囲の差異が小さいことにより、既往の研究に比べて、両者の相関は強くなった。

キーワード：配合、透気性、削孔法、簡易透気速度、小径ドリル型削孔試験、削孔速度

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の劣化、すなわち、部材内部の鉄筋の腐食や欠損は、塩分、水分などがコンクリート表層部から内部へと移動し、鉄筋位置まで到達することにより生じる。そのため、コンクリート中の物質移動抵抗性は、コンクリート部材の耐久性を評価する上で重要な指標となる。これまでに、コンクリート表層の物質移動抵抗性を評価するために、数多くの透水・透気試験方法が提案・検討されている。中でも、表層の透気試験方法とその評価に関する研究は近年特に盛んである¹⁾。

コンクリート表層の透気性を評価する試験方法のうち、削孔法による透気試験は広く知られている^{例えは2),3)}。削孔法による透気試験は、ドリル削孔によってコンクリートやモルタルに開けた、およそ $\phi 10\text{mm} \times 50\text{mm}$ 程度の孔内の気圧の変化と圧力変化に要する時間から透気性を評価するものである。筆者らは、これまでに、削孔法による透気試験で得られる透気速度と、微破壊試験装置のひとつである小径ドリル型削孔試験機^{4),5)}で得られる削孔速度との関係に注目した実験的検討^{6),7)}を行い、削孔速度によって、水セメント比の異なるモルタル表層の透気性の差異を評価できる可能性を示した。ただし、材料自体の機械的な抵抗である削孔速度と材料内部の気体の移動に対する抵抗である透気速度は、必ずしも同じ材料特性を評価しているものではないと推察されるため、今後、適用範囲も含めた検討が必要である。

一方、削孔法による透気試験の測定原理によれば、小径ドリル型削孔試験の削孔跡($\phi 3.1\text{mm} \times 10\text{mm}$)を、透気試験の試験孔として利用できる可能性がある。これが適用できれば、従来の削孔法よりも軽微な破壊での透気試験

が可能となる。さらに、削孔跡を試験孔とした透気性と削孔速度との関係が明らかになれば、構造物表層の品質評価手法の発展に大いに資すると考えられる。

そこで、本研究では、水セメント比および単位水量の異なるモルタルを対象に、小径ドリル型削孔試験の削孔跡を試験孔として、Figg-Poroscope法²⁾の適用を試みた。得られた透気試験結果を、既往の実験結果^{6),8)}と比較することで、削孔跡を試験孔とした透気試験の適用可能性を検討した。併せて、既報⁹⁾で得られたドリル削孔速度と、新たに実施したドリル削孔跡を利用した透気試験で得られた透気速度との関係についても検討した。

2. 水セメント比がドリル削孔速度と削孔跡を試験孔とした簡易透気速度に及ぼす影響(実験1)

2.1 実験要因

実験要因は4水準の水セメント比とし、それぞれ50, 55, 60, および65%とした。

2.2 モルタルの使用材料および配合

表-1にモルタルの使用材料を、表-2にモルタルの配合を示す。単位細骨材量は、水セメント比による影響を明確にするためにいずれも同一とし、空気量($8 \pm 2\%$)とフロー値(190 ± 20)も一定の範囲内に収まるように単位混和剤量で調整した。なお、表-2には、既報⁹⁾で得られた、各配合の小型容器ブリーディング量 $B_q(\phi^{125})$ も示す(表-3も同様とする)。

2.3 実験方法

(1) モルタルの練混ぜおよびフロー試験

モルタルの練混ぜおよびフロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法(10.4.3.練混ぜ方法および11.フロ

*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (学生会員)

*2 岐阜工業高等専門学校 建築学科

*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

一試験)」に準じて行った。

(2) フレッシュモルタルの空気量試験

フレッシュモルタルの空気量は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材(5.12.d.モルタルの単位容積質量の測定)」に準じて単位容積質量を測定し、JIS A 1116「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量方法)(6.2.空気量)」により算出した。

(3) 小径ドリル型削孔試験

本研究では、既報⁹⁾で得られた削孔速度 V_p に対し、考察を加えた上で、簡易透気速度と削孔速度との関係について検討を行う。以下に、試験方法と削孔速度の算出および補正方法について概説する。

図-1に、小径ドリル型削孔試験機を示す。この試験機は14Nの定荷重パネ2本を用い、測定部位に $\phi 2.8\text{mm}$ のダイヤモンドビットを押しつけ、定トルク、定回転数に制御されたモータによって深さ10mm程度まで削孔する装置である。なお、ビット先端には、ダイヤモンドの微粒子が付着しており、ビット径は $\phi 2.8\text{mm}$ でおおむね一定である。

図-2に、削孔試験に用いた試験体および測定位置を示す。削孔試験には、底面 $100\times 100\text{mm}$ 、高さ 200mm の角柱試験体を用いた。打込み面は、試験結果に及ぼすレイタンスの影響を極力排除することを目的として、木ごてを用いておよそ型枠の高さにならした後、試料を指で押した際に変形しない程度に固まった時点で、金ごてを強く押し付けながら押し固めて仕上げた。試験体は脱型後、材齢28日までは標準水中養生とし、その後、試験日とした材齢91日まで 20°C の気中養生とした。測定位置は、打込み面、上部側面、および下部側面の3面とし、各測定面において、図中に赤点で示した6点を削孔した。試験体数は1水準につき2体としたため、各測定面の削孔速度は、2体の試験体により得られる計12回の削孔速度の平均値とした。なお、図中に示す測定間隔は、加藤ら¹⁰⁾の検討を参考とし、隣接する削孔位置に影響を及ぼさない距離とした。また、本研究では、極表層部の品質評価を目的としているので、削孔速度として、削孔深さ0~5mmの範

围で算出された値を用いている。

削孔速度は、削孔対象(セメントペースト、空隙、骨材など)やダイヤモンド粒子の摩耗の程度、ビット自体の切れ味によって大きく異なる。そのため、以下の手順により、算出および補正した削孔速度を削孔速度 V_p とした。

1)主にセメントペースト部を削孔していると想定される部分を抽出する。2)削孔回数の増加にともない、ビットの切れ味が線形的に低下するものとして抽出された速度を補正する。3)最後に、ビット間の切れ味の違いについて、0.6mm未満の細骨材のみで作成したレファレンスモルタルを削孔した際の初期速度で補正した。セメントペースト部の抽出基準など詳細については既報⁹⁾を参照されたい。

(4) 小径ドリル型削孔試験の削孔跡を試験孔とした透気試験

本研究で検討する透気試験は、小径ドリル型削孔試験の削孔跡を試験孔とし、図-3に示す、Figg-Poroscope法²⁾に準じて実施した。なお、図中の試験孔の直径($\phi 3.1\text{mm}$)は、削孔試験の際の削孔粉排出を目的に、ビットが0.3mm程度偏心して取り付けられている⁵⁾ため、ビット径($\phi 2.8\text{mm}$)よりも大きくなっている。

モルタル試験体を実施した、小径ドリル型削孔試験の削孔跡内部にある異物をエアブローで吹き飛ばしてシリコン栓で密封した。透気試験装置をモルタル試験体に接続し、ポンプで孔内の圧力を55kPa以上になるまで減圧し試験を開始した。試験開始後、真空圧が55kPaから50kPaまで減少するのに要する時間が、その直前の計測時間と誤差2%以内に収束するまで測定を繰り返し、式(1)により透気性を簡易透気速度として求めた。

$$K = (X_2 - X_1) / T \quad (1)$$

ここに、 K ：簡易透気速度(kPa/s)

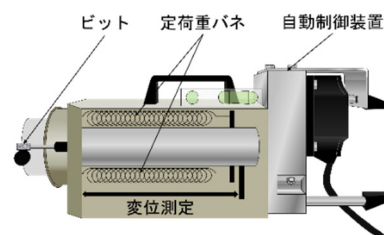


図-1 小径ドリル型削孔試験機

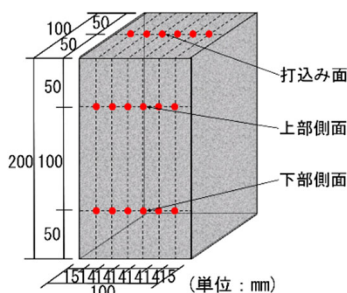


図-2 削孔試験用供試体と測定位置(実験1, 2)

表-1 モルタルの使用材料(実験1, 2)

材料名	種類	備考	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $3480\text{cm}^2/\text{g}$	C
細骨材	乾燥珪砂(4号, 5号)	絶対密度: $2.54\text{g}/\text{cm}^3$, 混合比率 1:1	S
混和剤	高性能減水剤(I種)	主成分: ポリカルボン酸コポリマー	AD
水	上水道水	-	W

表-2 モルタルの配合(実験1)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		S/C (wt)	単位量 (kg/m^3)				$B_a(\phi^{125})$ (cm^3/cm^2)
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD	
1	50	8 $\pm$ 2	9.0	190 $\pm$ 20	182	2.53	508	254	1284	0.72	0.14
2	55		7.6		190	2.68	479	263		0.52	0.31
3	60		7.6		202	2.84	452	271		0.55	0.39
4	65		7.2		203	3.00	428	278		0.23	0.54

X_1 : 測定開始時の真空圧 (55kPa)

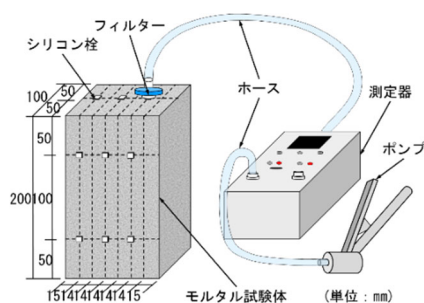
X_2 : 測定終了時の真空圧 (50kPa)

T : 真空圧の減少時間 (s)

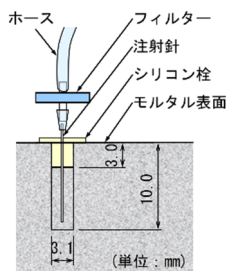
野中ら³⁾は、透気試験の試験孔の直径や深さを決定するにあたり、 $\phi 3.5\text{mm} \times 50\text{mm}$ などの直径のごく小さい試験孔での透気試験も検討しているが、本研究における試みではさらに小さい。したがって、透気試験に使用する針は、従来の試験よりも小径の針が適すると考えられた。また、図-2に示した隣接する試験孔の位置が簡易透気速度に影響を及ぼす場合、表層の透気性を正確に評価することは困難となる。したがって、実験を開始する前に、針の直径が簡易透気速度に及ぼす影響、および試験孔の中心間距離が簡易透気速度に及ぼす影響の2点について検討した。なお、これらの検討は、本実験に使用した水セメント比50および65%の試験体のうち、それぞれ1体の底面の削孔跡1か所を対象に、材齢1年で実施した。

1) 針の直径が簡易透気速度に及ぼす影響

図-4に、針の直径と簡易透気速度の関係を示す。検討した針の直径は、0.40、0.45、0.50、1.20、および、1.50mm



(a) 透気試験装置と測定位置



(b) 削孔部詳細

図-3 削孔跡を試験孔とした透気試験の概略

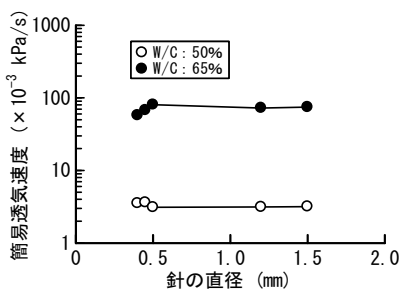


図-4 簡易透気速度と針の直径の関係

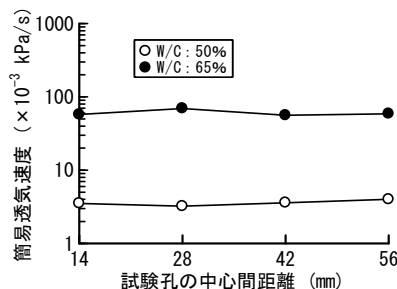


図-5 簡易透気速度と試験孔の中心間距離の関係

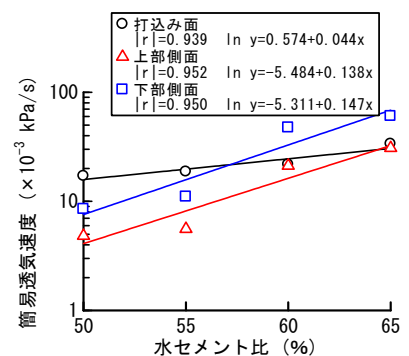


図-6 簡易透気速度と水セメント比の関係(実験1)

である。実験結果より、使用する針の直径によらず、簡易透気速度は計測可能であった。また、針の直径が0.40～0.50mmの範囲では、針の直径によって、簡易透気速度に若干の差異がみられるが、全体として、針の直径が簡易透気速度に及ぼす影響は小さいことが確認された。

2) 試験孔の中心間距離が簡易透気速度に及ぼす影響

図-5に、試験孔の中心間距離と簡易透気速度の関係を示す。試験孔の中心間距離は、図-2に示した削孔位置を参考に14mm毎に設定した。実験結果より、図-2に示した隣接する試験孔は簡易透気速度に影響を及ぼさないことが確認された。

以上の検討結果より、本研究の透気試験は、小径ドリル型削孔試験を実施した試験体を対象に、図-3(a)中のシリコン栓で示した、1測定面あたり3カ所を実施した。また、試験には、試験孔内の透気経路の確保、また、シリコン栓と針の界面からの漏気を極力抑制するため、検討した中で最小径の直径0.40mmの針を用いた。なお、念のため、透気試験に使用しない削孔跡は、ひび割れ補修材を充填することで穴埋めした。試験材齢は1年である。

試験体数は、小径ドリル型削孔試験と同様に、1水準につき2体とし、2体の試験体により得られる6か所の簡易透気速度を相乗平均した値を、その測定面の簡易透気速度とした。透気試験の直前に計測した各測定面の表面含水率は、実験1,2を通して最大で4.5%程度であり、SIA262¹⁾が定める表面含水率5.5%より小さい。したがって、本研究においては、透気試験における含水率の影響はほとんどないものとして、以降の考察をする。

2.4 実験結果および考察

(1) 水セメント比が簡易透気速度に及ぼす影響

図-6に、簡易透気速度と水セメント比の関係を示す。図中には、指数近似した相関係数 r の絶対値および回帰式を示す(図-9, 10, 13, 14も同様とする)。図から分かるように、いずれの測定面においても、水セメント比が大きくなると簡易透気速度は大きくなる傾向にあり、特に、側面の55～60%において顕著である。また、図中に示した相関係数 r から、簡易透気速度と水セメント比は強い相

関関係にあることが分かる。これにより、水セメント比の違いによるモルタル表層の品質の違いを、削孔跡を試験孔とした透気試験によっても評価できることが示された。一方、打込み面の簡易透気速度に及ぼす水セメント比の影響は、側面と比較して小さい。これは、コテ仕上げにより、打込み面表層の水セメント比による品質の差異が小さくなったことに起因すると考えられる。

図-7は、図-6に示した簡易透気速度と水セメント比の関係に加え、従来の削孔法による既往の研究結果^{6),8)}を併せて示したものである。図中には、指数近似した際の相関係数 r の絶対値も併記した(図-11も同様とする)。なお、既報⁶⁾では、28日の標準水中養生後、材齢2年まで気中養生した試験体の打込み面を、澤田ら⁸⁾の研究では、28日の標準水中養生後、材齢91日まで気中養生をした試験体の側面を対象に透気試験を実施しており、いずれも、本研究と同一の方法で $\phi 10\text{mm} \times 40\text{mm}$ の試験孔で測定されている。図より、本研究の簡易透気速度と水セメント比の関係における近似式の傾きは、既往の研究結果とおおむね同程度であり、相関係数も大きい。したがって、削孔跡を利用した透気試験は、従来の削孔法による透気試験と同様に、モルタル表層の水セメント比の差異を捉えることができ、表層の品質評価手法のひとつとして利用可能と考えられる。ただし、水セメント比が簡易透気速度に及ぼす影響は、既往の研究と比較して、打込み面においては小さく、側面においてはやや大きい。これは、本研究における透気試験が、表層から10mmと極表層のみを評価していることから、既往の研究と比較して、コテ仕上げや乾燥の影響を顕著に受けたためと考えられる。

また、簡易透気速度の大小関係に着目すると、簡易透気速度は、気中養生期間の長さ(2年⁶⁾、1年、91日⁸⁾)の順に小さくなっている。これは、野中ら³⁾や早川ら¹²⁾の報告にあるように、乾燥期間(気中養生期間)の増加に伴って、透気性が増大したものと推察される。

(2) 水セメント比が削孔速度と簡易透気速度の関係に及ぼす影響

図-8に、削孔速度 V_p と水セメント比の関係を示す。図中には、対数近似をした相関係数 r の絶対値および回帰式

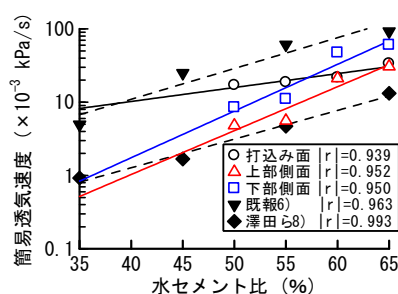


図-7 簡易透気速度と水セメント比の関係(既往の研究結果を含む)

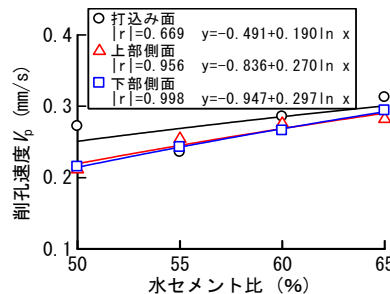


図-8 削孔速度 V_p と水セメント比の関係(実験1)

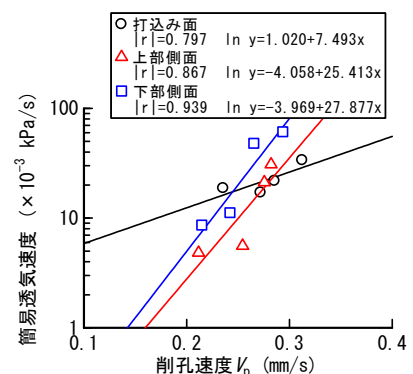


図-9 簡易透気速度と削孔速度 V_p の関係(実験1)

を示す(図-12も同様とする)。なお、回帰式は、既報⁴⁾で得られた削孔速度と圧縮強度の関係を参考に対数回帰とした。図から分かるように、打込み面を除き、水セメント比が大きくなると削孔速度 V_p は大きくなる傾向にあり、削孔速度 V_p と水セメント比は関関係にある。ここで、打込み面の相関係数が小さいのは、図-6で考察したとおり、打込み面の極表層の品質は水セメント比によらず均質化し、水セメント比間の削孔速度の差異が小さくなったことで、それぞれの水セメント比で測定した削孔速度のばらつきが大きく影響したためと考えられる。

図-9に、削孔速度 V_p と簡易透気速度の関係を示す。図から分かるように、いずれの測定面においても、削孔速度 V_p が大きくなると簡易透気速度は大きくなる傾向にあり、簡易透気速度と削孔速度 V_p は関関係にある。ここで、打込み面の近似曲線の傾きが側面と比較して小さくなっているのは、図-6に示した通り、打込み面では、水セメント比の違いによる簡易透気速度の差異が小さいため、その影響が、削孔速度 V_p と簡易透気速度の関係に現れたものと考えられる。

3. 単位水量がドリル削孔速度と削孔跡を試験孔とした簡易透気速度に及ぼす影響(実験2)

3.1 実験要因

実験要因は4水準の単位水量とし、それぞれ259, 266, 273, および280 kg/m^3 とした。

3.2 モルタルの使用材料および配合

モルタルの使用材料は、実験1と同様とした。表-3に、モルタルの配合を示す。

3.3 実験方法

実験方法は実験1と同様とした。

3.4 実験結果および考察

(1) 単位水量が簡易透気速度に及ぼす影響

図-10に、簡易透気速度と単位水量の関係を示す。図から分かるように、簡易透気速度に及ぼす単位水量の影響は水セメント比の影響と比較して小さい。

図-11は、図-10に示した簡易透気速度と単位水量の関係に加え、既往の研究結果^{6),8)}より、本研究と同じ、水セメント比を55%の一定とした上で単位水量を変化させた場合の実験結果を併せて示したものである。図から分かるように、試験孔の寸法によらず、単位水量が簡易透気速度に及ぼす影響は小さく、単位水量の差異による明確な傾向はみられない。同様の傾向は、野中ら³⁾によっても報告されていることから、削孔跡を試験孔とした透気試験は、少なくとも、従来の削孔法による透気試験と同等程度の精度で表層の品質評価が可能であると考えられる。

一方、本研究の打込み面や澤田ら⁸⁾の実験結果のように、単位水量が小さく、かつ、単位細骨材量が大きくなると簡易透気速度が大きくなる事例がみられた。澤田らや塚原ら¹³⁾は、ある条件下では、細骨材体積の増加によって、透気係数が大きく測定されることを報告している。本研究においても、単位細骨材量の増加にともない透気性が大きく測定されたとも考えられるが、詳細な条件については不明な点が多いため、細骨材が透気性に及ぼす影響については、今後の検討課題としたい。

(2) 単位水量が削孔速度と簡易透気速度の关系到及ぼす影響

図-12に、削孔速度 V_p と単位水量の関係を示す。図から分かるように、単位水量の違いによる削孔速度 V_p の差異は小さく、単位水量が273および280 kg/m^3 ではおおむね同じ値を示している。既報⁹⁾より、実験2における削孔速度 V_p の標準偏差は、いずれの単位水量においても0.017~0.027 mm/s の範囲に留まっていることから、削孔速度 V_p と単位水量の間には特定の傾向はみられない。これは、強度や硬化体組織を支配する水セメント比が同一であることが、単位水量の多寡と比較して削孔速度 V_p に大きく寄

表-3 モルタルの配合(実験2)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		S/C (wt)	単位量 (kg/m^3)				$B_g(\phi^{125})$ (cm^3/cm^2)
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD	
1	55	8	7.6	190	195	2.76	471	259	1300	0.91	0.18
2		± 2	7.5	± 20	199	2.63	484	266	1273	0.51	0.60
3			6.6		195	2.50	497	273	1243	0.22	0.62
4			6.4		198	2.39	509	280	1217	0.00	0.59

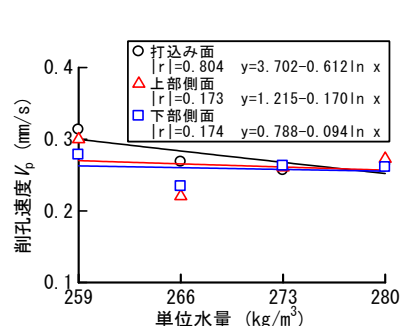


図-12 削孔速度 V_p と単位水量の関係(実験2)

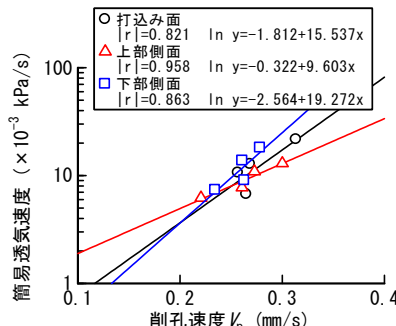


図-13 簡易透気速度と削孔速度 V_p の関係(実験2)

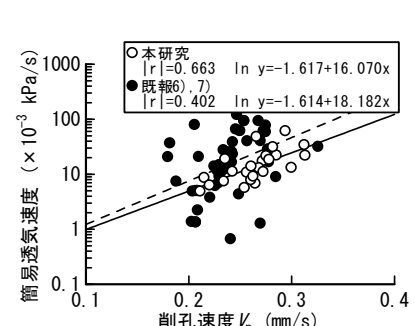


図-14 簡易透気速度と削孔速度 V_p の関係(既往の研究結果を含む)

与しているためであると推察される。一方、単位水量が259 kg/m^3 では、いずれの測定面においても、削孔速度 V_p は、相対的に大きな値を示している。これは、表-3に示した通り、単位水量が259 kg/m^3 では、小型容器ブリーディング量が著しく小さく、相対的に試料中の水セメント比が大きくなったことに起因していると推察される。

図-13に、削孔速度 V_p と簡易透気速度の関係を示す。図から分かるように、いずれの測定面においても、削孔速度 V_p が大きくなると簡易透気速度は大きくなる傾向にあり、簡易透気速度と削孔速度 V_p は相関関係にある。

図-14に、本研究と既報^{6),7)}で得られた簡易透気速度と削孔速度 V_p の関係を示す。なお、既報7)の簡易透気速度は、既報6)の簡易透気速度と同様の測定条件で得られた値である。また、本研究と既報では、削孔速度 V_p の算出・補正方法が若干異なる⁶⁾。図から分かるように、簡易透気速度と削孔速度 V_p の相関係数は、既報と比較して本

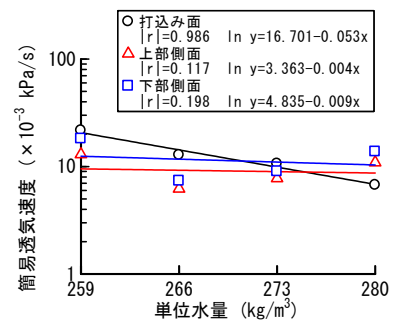


図-10 簡易透気速度と単位水量の関係(実験2)

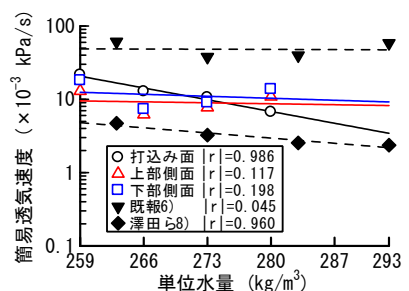


図-11 簡易透気速度と単位水量の関係(既往の研究結果を含む)

研究の方が大きい。これは、試験体の表層から40mmまでの間で、モルタルの組織が変化していることに起因すると考えられる。既報では、削孔試験の評価範囲は表層10mm、また、透気試験の評価範囲は表層40mmと、2つの試験の評価範囲が大きく異なり、試験によって評価範囲に含まれるモルタル組織が一部異なっていると考えられる。一方、本研究では、削孔試験と透気試験の評価範囲の差異が小さいため、いずれの試験でもおおむね同様の組織を評価していることにより、両者の相関が強くなったと推察される。このことから、2つの試験の評価深さの違いは、両者の相関関係に影響を及ぼすと推察されるが、試験孔の直径や削孔から測定までの期間など、その他の要因が両者の相関関係に及ぼす影響についても併せて検討する必要があるため、今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 削孔跡を試験孔とした簡易透気速度は、水セメント比と強い相関関係にある。
- 2) 削孔跡を試験孔とした簡易透気速度に及ぼす単位水量の影響は小さい。
- 3) 本実験で得られた簡易透気速度は、既往の研究^{3), 6), 8)}で得られた簡易透気速度と同様の傾向を示した。これにより、削孔跡を試験孔とした透気試験によって、従来の削孔法による透気試験と同様に、モルタル表層の品質評価が可能である。
- 4) 削孔速度 V_p が大きくなると簡易透気速度は大きくなる傾向にあり、削孔跡を試験孔とした簡易透気速度と削孔速度 V_p は相関関係にある。
- 5) 簡易透気速度と削孔速度 V_p の相関係数は、既報^{6), 7)}と比較して本研究の方が大きい。これは、本実験においては、簡易透気速度と削孔速度の評価範囲の差異が小さいことに起因すると推察される。

謝辞

本研究費の一部は、JSPS科研費JP19K04719(研究代表者：藤森繁)、ならびにJSPS科研費JP20K04802および令和元年度越山科学技術振興財団研究助成金(いずれも研究代表者：犬飼利嗣)によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 今本啓一：コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題，コンクリート工学，Vol.53，No.7，pp.606-613，2015.7
- 2) Figg, J. W. : Methods of measuring the air and water permeability of concrete , Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-219, Dec.1973

- 3) 野中 英，湯浅 昇：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第79巻，第700号，pp.689-696，2014.6
- 4) 朴 相俊，藤森 繁，青木孝義，畑中重光：小径ドリル型削孔試験機を用いたコンクリートの圧縮強度推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.1207-1212，2017.7
- 5) 藤森 繁，長谷川哲也，畑中重光，青木孝義，朴 相俊：小径ドリル型削孔試験機の改良とコンクリートへの適用のための検討，日本建築学会技術報告集，Vol.23，No.53，pp.25-30，2017.2
- 6) 安江歩夢，加藤和也，藤森 繁，犬飼利嗣：配合要因が硬化モルタル表層の透気性と削孔速度の関係に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.527-532，2019.7
- 7) 安江歩夢，早矢仕啓太，加藤和也，藤森 繁，犬飼利嗣：ドリル削孔速度による硬化モルタル表層の透気性の評価に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第19巻，pp.13-18，2019.10
- 8) 澤田 陽，田中愛美，片桐彰吾，犬飼利嗣：フレッシュモルタルの透水係数と硬化モルタルの透気性の関係に及ぼす配合要因の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第16巻，pp.251-256，2016.10
- 9) 安江歩夢，家田康暉，藤森 繁，犬飼利嗣：モルタルのブリーディングが硬化後表層のドリル削孔速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1528-1533，2020.7
- 10) 加藤万梨香，青木孝義，青木秀敬，朴 相俊，長谷川哲也：小径ドリル型削孔試験機を用いた煉瓦の圧縮強度推定，日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集，A-1，pp.637-638，2019.9
- 11) R. J. Torrent, F. Jacobs, Swiss Standard SIA 262:2003 A step towards performance-based specifications for durability, concrete in aggressive aqueous environments, performance, testing and modeling, 3-5 Jun. 2009, Toulouse, France
- 12) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol.68，No.4，pp.385-398，2012
- 13) 塚原絵万，加藤佳孝，魚本健人：欠陥を有するモルタル試験体の透気性に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.823-828，2001.6